



引文格式: 刘诚, 李含, 郑艳荣, 等. 综合物探方法在秦岭高植被覆盖深切区矿产预测中的应用[J]. 西北地质, 2025, 58(3): 108–119. DOI: 10.12401/j.nwg.2023057

Citation: LIU Cheng, LI Han, ZHENG Yanrong, et al. Application of Comprehensive Geophysical Prospecting Method in the Prediction of Mineral Resources in Qinling with High Vegetation Coverage and Deep Cut Area[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(3): 108–119. DOI: 10.12401/j.nwg.2023057

## 综合物探方法在秦岭高植被覆盖 深切区矿产预测中的应用

刘诚<sup>1,2,3</sup>, 李含<sup>1,2</sup>, 郑艳荣<sup>1,2</sup>, 薛东旭<sup>1,2</sup>, 王路智<sup>1,2</sup>, 姚川<sup>1,2</sup>, 杨可<sup>1,2</sup>

(1. 中国地质调查局金矿勘查技术创新中心, 陕西 西安 710100; 2. 中国地质调查局西安矿产资源调查中心, 陕西 西安 710100; 3. 中国地质大学(北京), 北京 100083)

**摘要:** 北秦岭地区是中国重要的金多金属资源产地, 特别是近年来蟒岭岩体周缘作为北秦岭成矿带的重要矿集区之一, 其成矿作用及控矿系统备受瞩目, 但区内林木茂密地形切割严重, 未系统开展过地球物理工作。笔者通过应用综合地球物理方法在北秦岭蟒岭岩体南缘庙沟地区开展找矿预测, 探索秦岭成矿带深切区、高植被覆盖区找矿预测技术方法组合。在工作区开展地面高精度磁法、激电中梯及可控源音频大地电磁测量(CSAMT)等地球物理探测, 综合物探方法联合解译了区域各地层间接触关系以及隐伏岩体侵位形成的推覆形态, 对区域含矿断裂带形态展开研究, 预测区域赋矿部位与成矿潜力, 结合工程揭露结果总结地球物理找矿标志, 圈定有利成矿区, 为今后该地区勘查提供重要依据。

**关键词:** 综合物探方法; 找矿预测; 蟒岭岩体南部; 深切区; 高植被覆盖区; 北秦岭

中图分类号: P631

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2025)03-0108-12

### Application of Comprehensive Geophysical Prospecting Method in the Prediction of Mineral Resources in Qinling with High Vegetation Coverage and Deep Cut Area

LIU Cheng<sup>1,2,3</sup>, LI Han<sup>1,2</sup>, ZHENG Yanrong<sup>1,2</sup>, XUE Dongxu<sup>1,2</sup>, WANG Luzhi<sup>1,2</sup>, YAO Chuan<sup>1,2</sup>, YANG Ke<sup>1,2</sup>

(1. Technology Innovation Center for Gold Ore Exploration, China Geological Survey, Xi'an 710100, Shaanxi, China;  
2. Xi'an Center of Mineral Resources Survey, China Geological Survey, Xi'an 710100, Shaanxi, China;  
3. China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract:** The North Qinling area is an important source of gold polymetallic resources in China, especially in recent years, the periphery of the Mangling pluton is one of the important ore concentration areas of the North Qinling metallogenic belt, and its metallogenic effect and ore-controlling system have attracted much attention. However, the densely forested terrain in the area is severely cut, and no systematic geophysical work has been

收稿日期: 2022-07-07; 修回日期: 2023-04-06; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20243342、DD20240019、DD20220966), 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2023-JCQN-0365)联合资助。

作者简介: 刘诚(1990-), 男, 工程师, 博士研究生, 主要从事固体矿产及深部地球物理探测工作。E-mail: liuchengHJ@163.com。

carried out. In this paper, through the application of comprehensive geophysical method Miaogou area on the southern margin of the n North Qinling rock pythons ridge predicting prospecting and exploration deep cut and high vegetation coverage area of the Qinling metallogenic belt in the prospecting prediction techniques combination. In the work area, geophysical surveys such as ground high-precision magnetic method, IP and controlled source audio magnetotelluric survey (CSAMT) are carried out. The comprehensive geophysical method jointly interprets the contact relationship between various layers in the region and the formation of the emplacement of the hidden rock mass. The shape of the nappe and the research on the shape of the regional ore-bearing fault zone. Conduct research on the morphology of the regional ore-bearing fault zone, predict the ore-bearing location and metallogenic potential of the region, summarize the geophysical prospecting signs based on the results of engineering disclosure, delineate favorable metallogenic areas, and provide an important basis for future exploration in this area.

**Keywords:** comprehensive geophysical methods; prospecting prediction; southern Mangling pluton; deep cutting area; high vegetation coverage area; North Qinling

北秦岭地区是中国重要的多金属资源产地,特别是近年来蟒岭岩体周缘作为北秦岭成矿带的重要矿集区之一,区内燕山期花岗岩发育,提供了铅锌钨钼等矿床形成和再富集条件。区内已探明皇台铁铜矿床、南台钨钼矿床、龙庙铅锌矿床、猪婆沟金矿、华阳川硬岩型铀多金属矿等一系列与花岗岩及区域性断裂相关的次级断裂关系密切的重要矿床(柯昌辉等, 2012a, 2012b; 姜寒冰等, 2014; 郭培虹等, 2024; 焦阳等, 2024)。区内受控于岩浆-断裂构造的控矿系统与周缘大型矿集区等方面问题引起众多学者的关注(郭岐明等, 2019; 党勘峰等, 2020; 朱雪丽等, 2021)。研究区位于北秦岭庙沟地区蟒岭岩体南侧,属于北秦岭南台-金牛坪加里东期-燕山期 IV 级成矿带东段。研究区成矿地质条件良好,也是前期化探 1:5 万水系沉积物测量圈定的钨钼金铅锌多金属异常区,元素异常套合较好,其主体位于庙沟地区元古界宽坪岩群四岔口组南侧地层接触带内,沿近 EW 向断裂呈带状分布,找矿潜力较大。

由于工作区位于秦岭造山带地质构造复杂,地形切割强烈相对高差 300 余 m,区内林木茂密、杂草丛生,植被覆盖严重,天然露头少见,仅在沟谷底部或陡崖处可寻,为地质观测和矿产勘查带来了较大困难。急需地球物理方法揭示植被覆盖层以下基岩结构,查证区域地球化学异常来源,探索出经济适用、方便可行、可信度高的地球物理方法技术体系。地球物理探测具有覆盖面积广、信息量大等特性,可提供丰富的深部地质信息,对同一地下目标体不同物性参数进行相应的表征(庞振甲等, 2022)。磁法勘探一般基于不

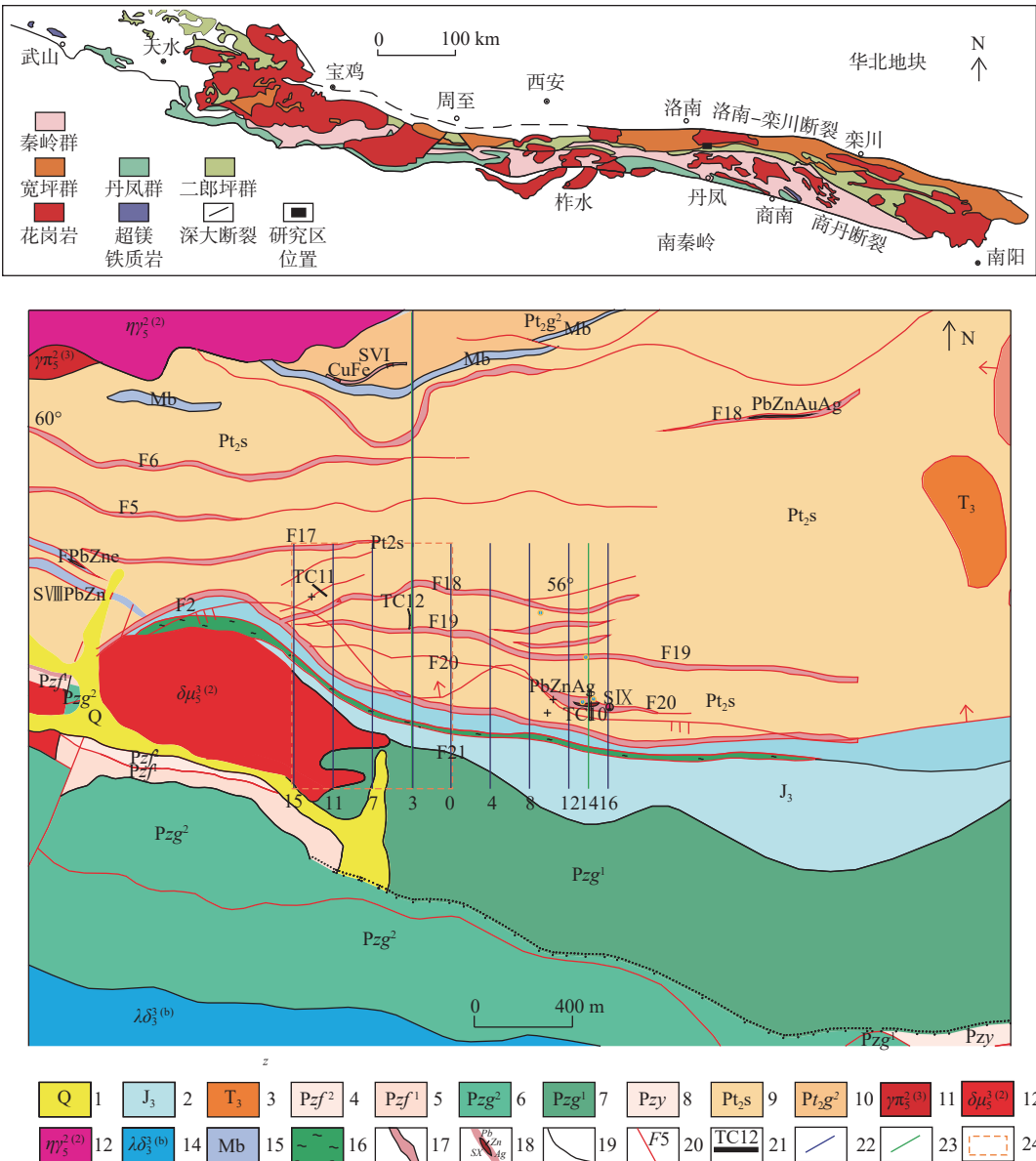
同岩石类型和矿石的磁性差异,控制地质体边界,圈定成矿过程中伴生矿物(如磁铁矿和磁黄铁矿)、深部断裂和磁性异常(卢焱等, 2008)。激电类方法依据岩石中金属硫化物均存在较为明显的激发极化特性的原理(林方丽等, 2016),多年实际工作也表明激电类方法对于金属矿产具有较为明确的指示作用,也可助力于区域成矿机制的判断。可控源音频大地电磁法(CSAMT)则是根据电磁场的趋肤效应原理,通过不同的周期电磁信号间的差异,反演计算地下各深度的电性分布特征(孙博等, 2015; 周聪等, 2015),提供矿床深部形态。笔者通过在蟒岭岩体南缘庙沟地区开展的地质和综合地球物理工作,总结地球物理找矿标志,构建地质-地球物理勘探模式(刘鲜民等, 2015; 郇文星等, 2019; 刘诚等, 2020, 2022),圈定有利成矿区,缩小找矿靶区,进而利用验证工程发现隐伏矿体,实现了找矿突破。

## 1 矿区地质及地球物理特征

### 1.1 研究区地质背景

研究区属秦岭褶皱系北秦岭加里东褶皱带的纸坊-永丰褶皱束的东段北缘,为多旋回褶皱带,总体为 EW 向潘河背斜向东延伸区的皇台-金盆次级褶皱轴部,皇台铜铁矿东侧延伸及铜沟铅锌银矿西侧延伸部位(郭岐明等, 2019),多次次侵入的燕山期蟒岭花岗岩体呈 EW 向横跨工作区北侧(图 1)。

研究区位于黑沟-栾川断裂和朱阳关-夏馆断裂之间,皇台-瓦穴子断裂从研究区中部穿过,其为区内



1.第四系；2.砾岩夹浅变质含砾石英砂岩；3.粉砂质板岩及绢云母板岩；4.云母石英片岩夹大理岩；5.浅变质石英砂岩；6.大理岩；7.二云石英片岩；8.大理岩、泥质条带大理岩；9.二云石英片岩；10.阳起钠长绿泥片岩；11.黑云母花岗斑岩；12.花岗闪长斑岩；13.黑云母二长花岗岩；14.闪长玢岩；15.大理岩；16.绿片岩；17.破碎带；18.含矿蚀变带及编号；19.地质界线；20.断裂及编号；21.探槽；22.激电中梯测线；23.CSAMT 测线；24.高精度磁法工作区

图1 研究区大地位置及地质简图

Fig. 1 Simplified regional geological map

主导构造,同时由于北侧蟒岭岩体出现多期次自北向南推覆过程,发育一系列与其平行的次级断裂。工作区地层整体呈一北倾的单斜或复式单斜层,走向近EW,局部反倾,倾角为 $5^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 。由于花岗岩岩枝的顺层贯入及后期区域性的挤压应力作用,在地层中形成一些小而宽缓的背向形褶皱。近EW向多组断裂穿工作区中部而过,宽坪岩群地层与蟒岭岩体间接带以及邻近地层多呈压扭性断裂形式接触,岩石变形

强烈,逆冲推覆于新地层之上,局部形成小型背斜,大致向东倾覆,与岩石片理走向基本一致。

庙沟地区出露地层主要为中元古界以及中生界、新生界地层,中元古界主要为宽坪群四岔口组( $Pt_2s$ ),由变质的碎屑岩-海相基性火山岩及硅镁质碳酸盐岩组成。中生界主要为侏罗系上统( $J_3$ )为一套陆相堆积粗碎屑岩系,下部主要为紫红色砾岩夹砂岩,底部夹紫灰色安山岩;上部以灰绿色砂岩、粉砂岩为主,夹砾

岩。新生界主要为第四系(Q), 分布于河流、沟谷两侧。其中, 以绢云母石英片岩、含碳质绢云石英片岩为主的宽坪岩群与矿床铅、锌、金矿化成矿关系密切, 主要分布于矿区北部, 出露范围较大, 岩石变形强烈, 逆冲推覆于新地层之上, 局部形成小型背斜, 大致向东倾覆。燕山期以来的构造岩浆活动、含矿热液迭加改造对成矿元素活化、富集具重要的促进和控制作用。西南侧出露狮子坪岩体, 属燕山晚期花岗闪长斑岩体, 西侧、南侧为断层接触, 东侧、北侧侵入于侏罗系地层中, 但结合前期地质工作认识狮子坪岩体同区域成矿未发生直接联系。

1.2 研究区地球物理特征

物性参数是物探工作解释的基础, 也是建立地质-地球物理模型的纽带。通过对工作区电、磁物性的系统测定, 显示各地层间岩矿石物性差异较为明显, 提供了综合电、磁地球物理探测深部赋矿位置的良好基

础(程远等, 2018; 张成信等, 2024)。

从电性角度看, 区内主要矿化蚀变岩石极化率较高, 基本在 3% 以上, 槽探中见铅锌矿位置极化率在 7%~8%, 工作区南侧诸如砾岩、花岗岩、安山岩等均同赋矿位置无关对地层极化率均低于 2%(表 1)。极化率和硅化蚀变相关程度很高, 但并非所有石英片岩地层均呈现高极化特征, 未蚀变的片岩露头极化率小于 2%, 由此证明并非整套地层均表现为高极化特征。蚀变的石英片岩及含碳质石英片岩电阻率最低, 基本在 100 Ω·m 以下, 而未破碎的石英片岩地层及其他围岩电阻率一般在 200 Ω·m 以上, 研究区西南侧的狮子坪岩体电阻率更是接近 1 000 Ω·m。电阻率参数更多同地下地质体的破碎变形程度相关。同一套石英片岩地层其破碎程度不同, 电阻率存在一个数量级以上的差异, 对于在研究区寻找隐伏断裂构造具有较强的指示意义。

表 1 矿区岩、矿石电性参数表  
Tab. 1 Mine rock and ore electrical parameter table

| 岩性     | 块数 | 电阻率ρ(Ω·m) |        | 极化率η(%)    |      | 备注    |
|--------|----|-----------|--------|------------|------|-------|
|        |    | 区间        | 平均值    | 区间         | 平均值  |       |
| 花岗岩岩体  | 20 | 306~1 615 | 721.6  | 0.365~2.97 | 0.79 | 狮子坪岩体 |
| 砾岩     | 10 | 153~423   | 242.2  | 0.275~1.2  | 0.61 | 晚侏罗纪  |
| 石英片岩   | 16 | 44~314    | 214.3  | 1.06~1.48  | 1.27 | 二叠纪   |
| 蚀变石英片岩 | 20 | 60~238    | 127.68 | 0.56~32.31 | 4.03 | 破碎    |
| 接触带    | 8  | 772~996   | 878.8  | 6.34~9.5   | 7.78 | 未破碎   |
| 安山岩    | 5  | 298~457   | 361.3  | 0.83~1.08  | 0.96 |       |
| 含碳质片岩  | 5  | 23~47     | 31     | 5.13~6.15  | 5.49 |       |

区内花岗岩及安山岩为代表的火成岩磁性最强(表 2), 但地表观察主要含矿地层以及矿化蚀变并非含磁性物质, 显著的高磁异常应仅为狮子坪花岗

表 2 矿区岩、矿石磁性参数表

Tab. 2 Mine rock and ore magnetic parameter table

| 岩性     | 块数 | 磁化率SI(10 <sup>-6</sup> ) |       | 备注    |
|--------|----|--------------------------|-------|-------|
|        |    | 区间                       | 平均值   |       |
| 花岗岩岩体  | 37 | 105~654                  | 324.4 | 狮子坪岩体 |
| 砾岩     | 15 | 10~28                    | 16.3  | 晚侏罗纪  |
| 石英片岩   | 20 | 0~4                      | 1.73  | 二叠纪   |
| 蚀变石英片岩 | 15 | -4~4                     | 0.13  | 破碎    |
| 蚀变石英片岩 | 10 | 9~16                     | 12.8  | 未破碎   |
| 安山岩    | 5  | 371~504                  | 422   |       |
| 含碳质片岩  | 10 | 3~12                     | 7.1   |       |

斑岩体及其隐伏部分的反映。而未破碎石英片岩、砾岩的磁性都近乎为 0, 在重点关注的石英片岩地层未破碎的地层磁化率略高于破碎地层, 未破碎地层磁化率略高应该同未破碎地层的定向排列有关, 破碎带变形强度较大, 故基本呈现无磁性乃至负磁性。由于区域围岩本身接近无磁性, 部分金属矿化蚀变岩由于金属矿物富集形成的相对弱磁特征具备一定指示意义。

区内已知的矿化点相对围岩具有较为明显的低电阻率、高极化率和低磁化率的综合物性特征, 围岩中砾岩、花岗岩等高阻、低极化的特征同赋矿区域差异显著, 而石英片岩地层中依旧可以通过弱异常区分出其中破碎变形、矿化蚀变更显著的区域。综上所述, 在区内具备开展地球物理工作的物性基础。



## 2 工作方法及应用

物探方法是研究寻找矿床深部形态及地质构造的有效手段(陈靖等, 2024; 刘诚等, 2024), 秦岭地区地质情况复杂, 很多基础地质问题尚未厘定, 难以直接寻找特定层位或构造位置定位矿床, 但岩石的矿化蚀变会引起诸多物理性质的改变, 不同的物探手段可以反映不同岩体和矿石的物性参数, 通过多种方法组合彼此约束优化提升地质地球物理模型真实性, 进而从中分辨出深部可能的含矿构造。在金及多金属矿床的勘查中, 可控源音频大地电磁法、激发极化法和地面高精度磁测 3 种方法的综合使用(孟银生等, 2016; 徐荣华等, 2017), 对于建立岩浆-断裂构造导矿构造系统, 预测区域成矿潜力, 能够提供多物性的地下赋

矿模型。

### 2.1 地面高精度磁法

地面高精度磁法数据采用 GSM-19T 质子磁力仪采集完成, 共完成剖面 10 km(线距为 80 m, 点距为 20 m), 布置于重点工作区西侧(图 1), 绘图数据经日改、正常场改正、高度改正计算所得  $\Delta T$ , 而后通过  $\Delta T$  化极后的异常形成平面等值线图(图 2)。上述结果为地下信息的综合反映, 为了分别研究近地表和深部磁性分布特征需进行位场分离, 本次研究采用优化滤波的方法取代传统向上延拓的处理手段(郭良辉等, 2012; 孟小红等, 2012), 传统延拓中浅部异常和深部异常被同步压制, 分离效果不佳, 在实际应用中必须明确的延拓高度反而往往未知(Zeng et al., 2007)。优化滤波处理是将磁异常视为频率域不同频段层(深度)异常形态的叠加, 根据区域磁异常径向对数功率谱形态特征,

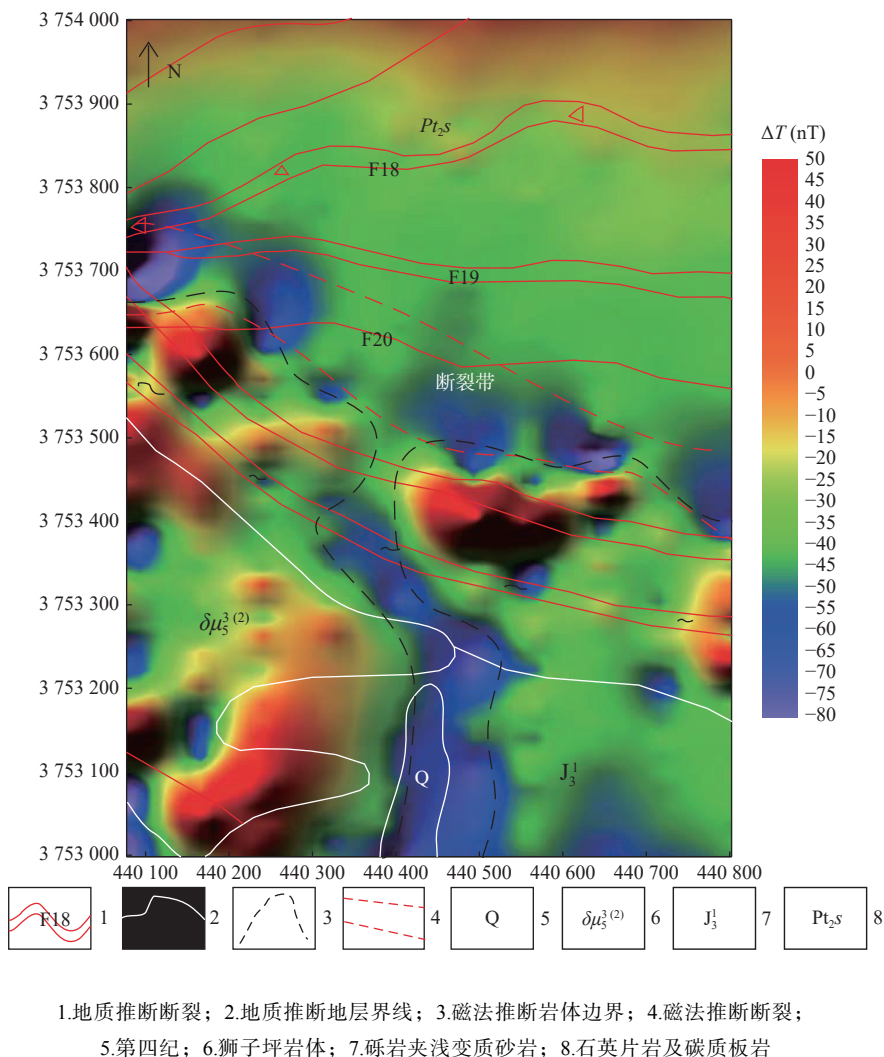


图2 庙沟地区  $\Delta T$  化极等值线图

Fig. 2 Contour map of magnetic anomalies  $\Delta T$  reduction to the pole in Miaogou area

采用7个格林等效层分段拟合。经优化滤波处理后,其中,0~0.16 cycles/km 频段对应区域磁异常(图3a)基本反映了磁性基底的主要特征,整体呈现出

中间低南北两侧高的趋势,0.36-1 cycles/km 频段对应局部磁异常(图3b)则反映了近地表岩体和构造特征,中间频段信息予以舍弃。

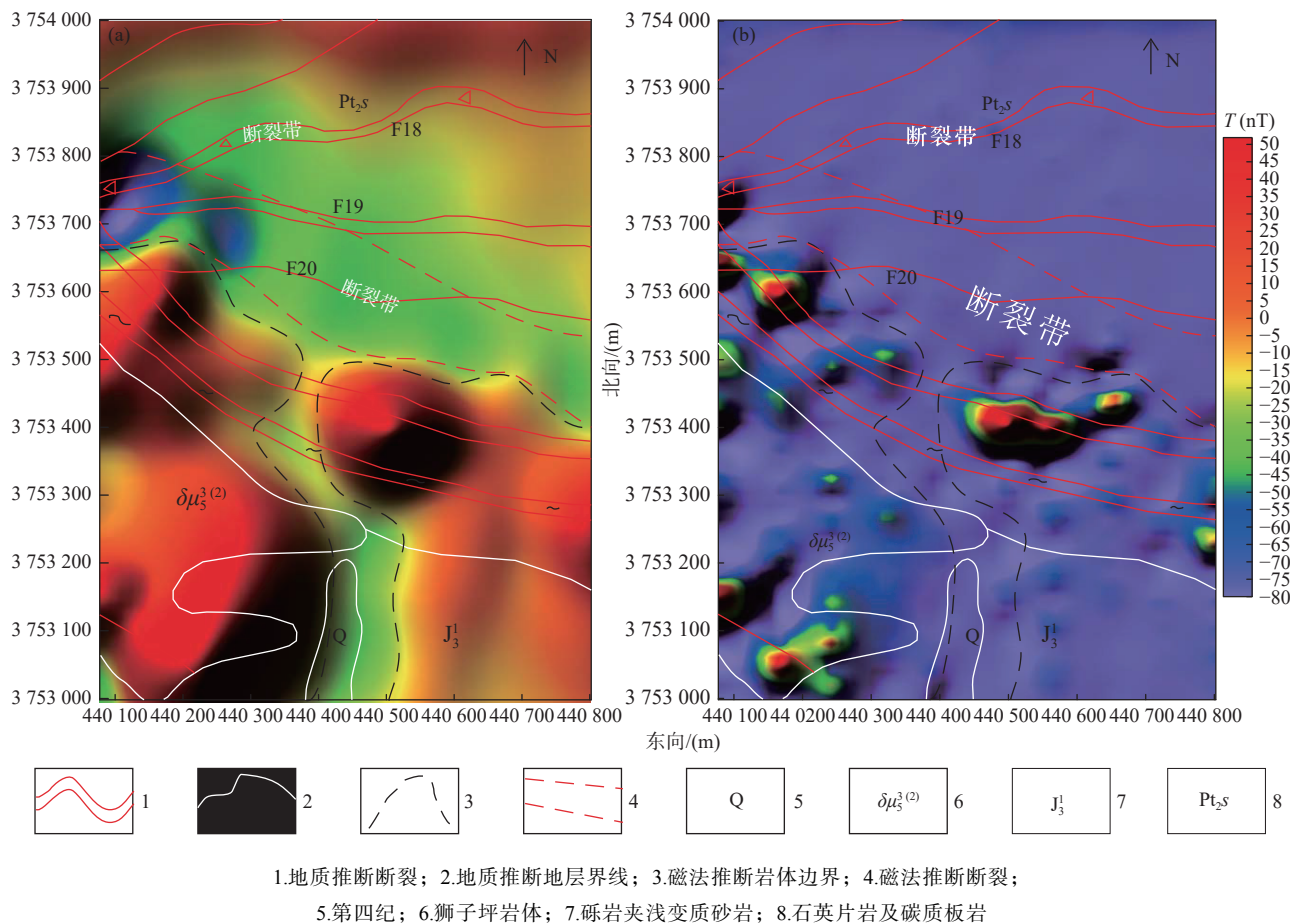


图3 庙沟地区区域磁异常(a)、局部磁异常(b)等值线图

Fig. 3 The contour map of (a) regional magnetic anomaly and (b) local magnetic anomaly in Miaogou area

## 2.2 激电中梯剖面测量

激电测量工作采用中间梯度装置,采集设备为DWJ-3B型微机激电仪,供电极距AB为1600 m,测量极距MN为40 m,供电电压大于500 V,供电电流>5A,获得了约10 km的1:1万比例尺的激电数据(线距为160 m,点距为20 m)。其中,激电数据采用视极化率和视电阻率等值线图进行分析(图4)。

## 2.3 可控源音频大地电磁法

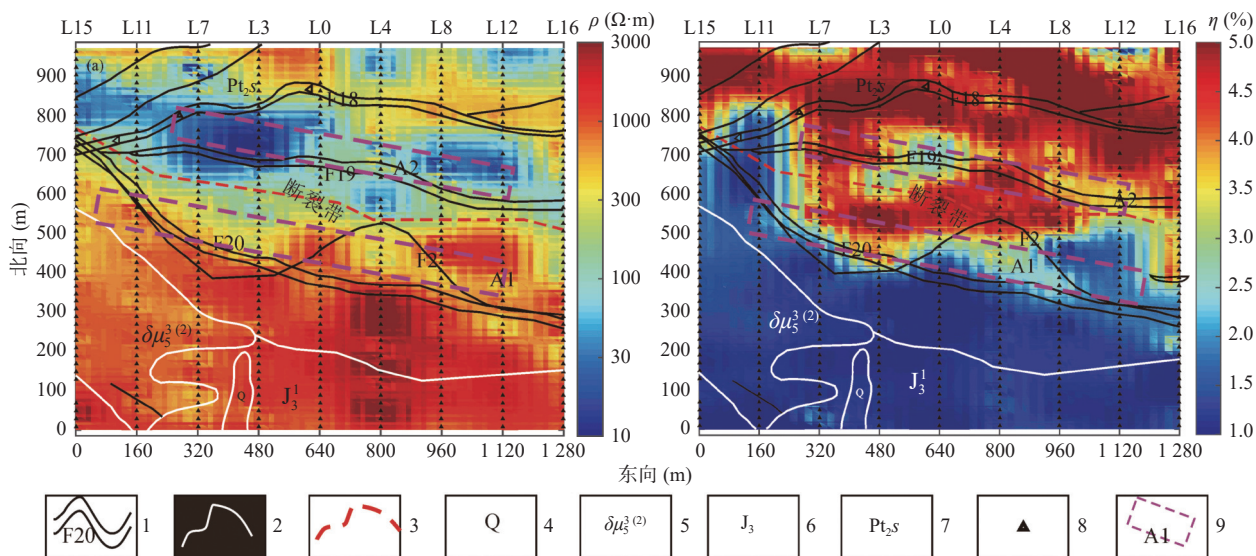
CSAMT数据采集采用美国ZONGE公司的GDP-32II多功能电法工作站,共完成154点,点距为20 m,收发距为9~10 km。数据处理时选择最低远场频率为4 Hz。由于测区位于秦岭山区,无明显干扰源,因而各测点数据质量较高,视电阻率和阻抗相位的平均方相对误差小于±5%;对原始数据进行远区数据筛选、静态校正等预处理后,选用基于圆滑模型反演

(Occam)算法的SCS2D软件对不同参数进行反演并进行地形改正,初始电阻率模型选取二维移动滑动平均数据,反演拟合差均不高于2,最终结合已有资料选择最匹配已知地质情况的二维反演电阻率模型进行推断解释。

## 3 地球物理特征及解译

### 3.1 地面高精度磁法结果及解译

研究区位于长约5 km沿宽坪岩群与二郎坪岩群间近EW向断裂带串珠状分布的异常附近,但上述区域地磁异常同化探异常不对应,且总体受狮子坪岩体影响显著远离岩体异常减弱,断裂带南界与侏罗系地层交替区或断裂带中综上所述研究区西南侧的狮子坪岩体及区域内的火成岩同赋矿位置并无明显的成生



1.地质推断断裂; 2.地质推断地层界线; 3.激电推断断裂; 4.第四纪 5.狮子坪岩体;  
6.砾岩夹浅变质砂岩; 7.石英片岩及碳质板岩; 8.测点位置; 9.异常区

图4 激电中梯视电阻率(a)、极化率(b)平面等值线图

Fig. 4 (a) Apparent resistivity and (b) polarizability contour map in TDIP

关系。

通过本次工作完成的高精度磁法进行处理、化极后成图,获得了区域磁场分布(图2),整个磁法工作区主要分为差异显著的4个部分。西南侧强异常区,磁异常高低起伏比较显著,正负异常间隔出现跳动明显,经优化滤波处理后,深浅源异常分离,深源异常中高磁异常显著(图3)。狮子坪花岗岩体是区内唯一磁化率较高的岩性,由此可初步推测岩体在区内的分布范围,研究区南侧第四纪覆盖下应为岩体隐伏部分。研究区东南侧化极后磁异常以较弱的正异常为主,经优化滤波后深源高值异常稳定显著,推断其为岩体深部的隐伏部分。

在工作区中部有一 NWW 向的负磁异常带,由于区域构造背景是蟒岭岩体形成过程中向南推覆,在南侧蟒岭岩体一带受阻,推测于此处形成一系列断层破碎带,磁负异常区域较地表观测断裂带更宽,破碎带深部应呈汇聚状,共同构成一条宽度较大的构造及明显的岩性接触带。以 NWW 向负异常为界,工作区北侧为稳定弱正异常区,磁异常相对稳定呈平稳增加的趋势,但是自南向北存在一系列不显著阶梯状分布,这种弱异常所形成的阶梯异常结合地质资料认为异常强度的梯度变化应是在近 SN 向构造应力作用下,形成一系列小规模推覆构造及近 EW 向断裂构造的影响,造成磁场异常分段连续变化的原因。图中  $\Delta T$  除趋势性的自南向北增加,仍表现一定起伏,矿化

蚀变、构造破碎都可导致磁化率减弱,故推测工作区的不均匀磁场可能与岩石的蚀变相关。

### 3.2 激电中梯结果及解译

通过工作区电阻率异常和极化率异常等值线图(图4)可知,整个工作区可以分为电性结构截然不同的两部分,工作区南侧表现为高阻、低极化特征,其主要对应西南侧狮子坪花岗闪长斑岩以及南侧的砾岩夹变质砂岩,大面积高阻异常代表工作区南侧地层较为稳定。结合前文所述的磁异常可以认为,南侧狮子坪岩体侵入侏罗系地层下方。与此同时低极化率表明工作区南侧未发生硫化蚀变富集的现象,整个工作区南侧成矿潜力较小。狮子坪岩体和地层的接触部位并未出现电阻率、极化率异常,区域成矿同狮子坪岩体关系有限,应将主要的关注点放在近 EW 向断裂带周边。

在剖面中部存在一处明显的电性梯度带,其中电阻率的梯度带应为 F20 的反映,极化率的梯度带大致对应区内 F2 断裂带,极化率梯度带较电阻率梯度带更偏南,由前期地质结果可知, F2 断裂带是不同年代的地层间的接触界限,在 F2 断裂以北是变形较为强烈的绢云石英片岩,而电阻率的梯度变化在大致 F20 的位置,同时电阻率在 F2 处也有一定显示但不够明显。工作区北部以绢云石英片岩为主的地层总体呈现高极化率异常,与物性参数对应较好,高极化异常范围较低阻异常围更大,低阻异常集中于 F20 至 F18



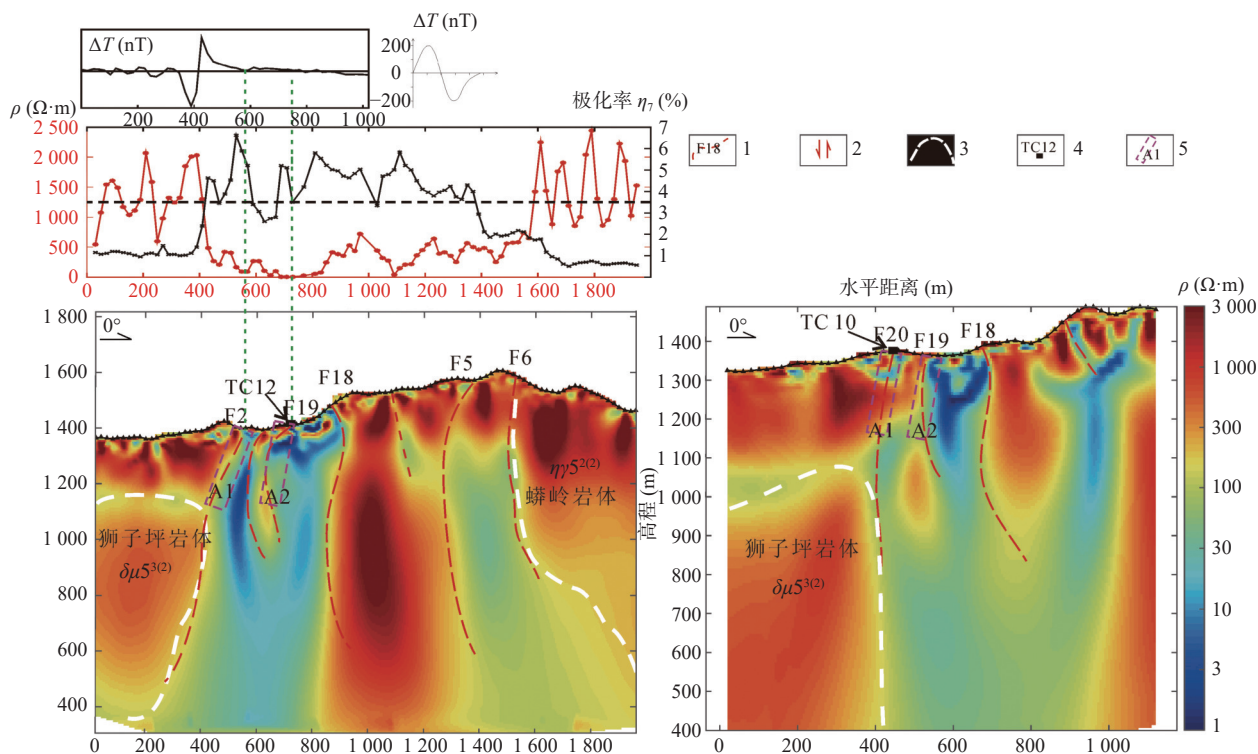
之间,特别是在剖面北端电阻率异常已有所回升,这一结果同CSAMT工作近地表电阻率相互映证,而低阻异常的区域和目前所认为的矿脉位置更为重合,推测图中粉色虚线框A1、A2对应F18至F20区间内的低阻异常应是区内断裂及裂隙发育,同时充填密集的黄铁矿及褐铁矿蚀变或者断裂充水的结果。经实测在此区域内电阻率在 $50\ \Omega\cdot\text{m}$ 以内,电阻率的极低值应同地层破碎程度以及破碎带中矿化蚀变程度正相关。在工作区800 m左右的位置,即F18断裂带附近,呈现一个低阻高极化异常带,具备区域找矿潜力。

### 3.3 可控源音频大地电深(CSAMT)结果及解译

结合地质特征、磁异常和激电异常形态,选择3线、14线进行可控源音频大地电磁测深(CSAMT)测量,利用其结果,对工作区各地质体在深部的展布及其形态规模、产状变化等进行预测(陆桂福等, 2014),并揭示矿化蚀变带变化情况。

由3线CSAMT反演电阻率断面图可看出在剖面500 m处的电性梯度带同地面磁法异常位置吻合,共同反映了两个年代地层于F2断裂呈断层接触,且此断裂向深部延伸明显,应是区域内一处主干断裂。通过本次工作结果发现,在近400 m范围内的低阻区

域内并不是电阻率均一的低阻异常,在整体低电阻率的背景异常中,仍存在两条较为明显的低阻条带呈Y型在深部汇聚,14线剖面亦有类似异常(图5)。25~29点下方低阻异常近直立略向北倾;35~38点下方低阻异常南倾,两处低阻条带电阻率均在 $50\ \Omega\cdot\text{m}$ 以下,低阻特征显著且在深部融合,推断本区域受近SN向构造应力作用,地层不断向南挤压推覆,在F2断裂遇到稳定的晚侏罗纪砂砾岩地层后,无法继续向前,应力在内部释放,在石英片岩区形成较为广泛的破碎带,各条破碎带在地表表现为近平行的一系列断裂F18、F19、F20,而在地下深部其应为一整套破碎带。从极化率和CSAMT电阻率剖面的结果结合来看,在剖面400~800 m范围内总体呈现低阻高极化的特征,但是在高背景场中可以看出,红色虚线所标出的两条低阻带位置仍属于总体异常区内的局部的低阻高极化位置。在北侧表现为相对均以稳定的高阻异常,无贯穿至深部的低阻破碎带,找矿方向聚焦于剖面900 m以南的区域。特别是在剖面900~1400 m范围内,图中F18断裂以北F5断裂带以南被认为是相同岩性同一地层极化率依旧表现为高值异常,但电阻率显著提升表明北部地层更为完整,未发生大规模的破碎缺



1.推断断裂; 2.层间剪切带; 3.推断隐伏岩体范围; 4.槽探位置; 5.推断异常区

图5 3线(左)、14线综合物探结果剖面及推断解译

Fig. 5 Line 3 (left) and Line 14 (right) comprehensive geophysical survey results and interpretation



少含矿热液进行物质交换最终富集成矿的空间。

高极化异常反映的是此套地层的共性,同时也可以反映高极化特征不是单纯由于破碎带引起的,区域成矿的来源可能为研究区北侧蟒岭岩体,蟒岭岩体的南接触边缘形成了广泛的矿化蚀变,虽然地表观测为同一种岩性但其电性特征已显著变化,同为高极化异常但高阻对应地层更为致密完整,缺少赋矿空间,个人认为工作区北部找矿潜力无法同南侧相比。值得引起注意的是剖面 1400~1600 m 处在标高 1200 m 下方电阻率低于表层,两者间界限较为明显且连续,同时从极化率来看,此区域明显区别于南侧地层高极化异常和北侧低极化率异常,呈两者间的阶梯状,而极化率又被认为是地下一定深度的综合反映,推测顶部为由北向南挤压推覆的地层上覆于原地层之上,同时通过反演结果表层高阻异常的形态特征,具备一定的对称性可以还原出部分褶皱形态。

14 线剖面总长为 1160 m,同 3 线剖面电性结构基本一致,剖面南侧为高阻的晚侏罗砾岩夹变质石英砂岩,中间为低阻的破碎带密集分布的石英片岩,剖面北侧电阻率逐步回升高低阻间隔排列,表明岩石破碎程度降低。从 14 线和 3 线对比来看,断裂带应呈 NWW 向延伸,F18 和 F19 在两条测线的表现十分一致,均表现为 Y 型的低阻异常向深部延展,同时断裂带向东有收窄的趋势,且东侧 14 线破碎程度明显低于 3 线,对应位置出现电阻率明显高于 3 线现象,在地层岩性一致的情况下,表明东侧地层更为完整。

#### 4 地球物理找矿模型及验证

研究区内矿化蚀变岩具高极化特征( $>3\%$ ),狮子坪岩体极化率较低( $<2\%$ ),铅锌矿体极化率为  $7\%\sim 8\%$ 。四岔口组蚀变石英片岩和含碳质石英片岩电阻率最低,基本小于  $100\ \Omega\cdot\text{m}$ ;未破碎的石英片岩电阻率在  $200\ \Omega\cdot\text{m}$  以上。激电结果显示,F18 断裂带呈现低阻高极化异常带,具备找矿潜力。进一步结合 CSAMT 结果,F18 断裂带位于蟒岭岩体南侧逆冲推覆构造的前缘,区域内四岔口组由北至南逆冲推覆于新地层之上且此处矿化蚀变最为显著,构造变形十分发育,提供丰富的运移空间。大量深部含矿热液流体经深大断裂为向上运移,上升至构造交汇处经历充分的物质交换从而富集成矿。其中推覆体前缘的近 EW 向构造蚀变破碎带 A1、A2 推测为区内成矿的有利部位,

而依据磁法异常确定对应地质体边界及激电异常确定高极化率异常区的展布方向均与地层、构造的走向一致,说明物探异常与地质构造关系密切(孟银生等,2016;李荣亮等,2017),具有重要的找矿意义。

结合上述异常在研究区 A1、A2 异常位置(图 5)分别开展了探槽 TC02、TC03、TC12 工作,其中 TC12 位于 3 线,TC10 位于 14 线附近,TC12 控制 3 号矿化带,见金矿脉 1 条,真厚度 0.89 m,Au 品位  $7.64\times 10^{-6}$ ,本次发现属宽坪岩群中首次发现高品位金矿体,极大拓展了北秦岭地区金找矿空间。另见两条厚 2 m、4 m 的铅矿体,铅平均品位分别为  $0.32\%$ 、 $0.39\%$ 。其中,TC12 位置大概在 3 线剖面 700 m 电性梯度带位置,其矿化显示和附近的低阻高极化特征吻合,对应含矿破碎带总体呈弧状南倾。3 线结果表明,在 TC12 以北为电阻率更低的断裂带核心部位,但区域成矿富集是否同破碎程度呈正相关,或者破碎带只是广泛蚀变的导矿构造,有待进一步探讨,具备进一步工作的价值。

结合区域已有找矿成果,同在蟒岭岩体南缘宽坪群四岔口组中发现与小规模斑岩体相关的多处 Pb-Zn-Ag 矿体,其与毛景文等(2009)所总结的燕山期以来的构造-岩浆活动、含矿热液的叠加、改造,进而富集成矿的东秦岭岩浆热液矿床模型相符。研究区南侧曾发生持续的下地壳折沉运动,地壳减薄导致周围软流圈地幔上涌,深部含矿岩浆沿深大断裂及构造薄弱部位上侵(Han et.al, 2013),并在上升过程萃取了围岩中的 Pb、Zn、Ag、Au 等成矿元素(郭岐明等,2019)。区域大规模成矿事件为蟒岭岩体南缘沿近 EW 向断裂带分布的铅锌银矿床提供物质能量来源。北侧蟒岭岩体形成过程中,在研究区附近形成一系列的高角度逆冲推覆构造及深大断裂提供丰富的赋矿空间。具体到研究区,近 EW 向的构造蚀变破碎带是多金属矿化的主要容矿构造,控制着矿体的规模及形态,而花岗质岩体是本区成矿物质的主要来源,或是利于地层成矿元素的活化富集。

#### 5 高植被覆盖深切割区技术方法组合

研究区位于秦岭造山带内,区域矿产地质调查程度较高,但基本是基于传统的路线地质调查结合水系沉积物异常查证完成的,与此同时目前中国西部高寒深切割地区应用广泛的遥感手段难以穿透近地表的植被覆盖取得预期的解译效果(赵小星,2017;任广利

等, 2017; 高猛等, 2019), 地质矿产路线检查也由于近地表露头少, 植被覆盖下基岩与转石不易辨别, 容易对地质体的圈连产生困惑。故对于深切割高植被覆盖区经济有效、可实施的物探技术方法组合予以总结十分必要。

结合本次研究及工作实际, 在秦岭高植被覆盖、深切割区可采用高精度磁法+小功率激电+电磁测深的技术方法组合经济高效完成重点研究区基于地球物理探测的矿产资源预测评价工作。在充分搜集整理地质资料的基础上确定研究区目标体的特征, 而后开展面积性磁法、激电工作, 其中通过磁异常圈定岩体、激电异常圈出矿化蚀变范围, 两者共同确定构造, 而后通过 CSAMT 等电磁测深定位赋矿有利部位, 将物探手段获得的物性异常转化为地质解译, 完成高植被覆盖深切割区矿产预测工作。地面高精度磁法和激电中梯能够快速提供一定范围的面积性物探成果, 提供已知矿化线索的平面展布, 而电磁测深方法则可以以为已发现矿化线索的重点区提供深部信息。其中, 地面高精度磁法是地球物理手段中最为轻便的能够在绝大多数地形条件开展工作, 个别点位的偏移、舍弃不会过于影响研究区异常的整体形态, 对于秦岭深切割地区十分有效, 磁法也是识别岩体边界和断裂构造的有效手段。基于研究区特殊的地形地貌特征, 出于施工可行性和经济型考虑, 减少了在类似区域内布置大功率、大极距激电工作, 规避因地形、极距等影响导致一次电位过小的现实问题。小功率激电工作可以减小供电装置的尺寸、重量, 在更多地区开展工作, 而在植被覆盖区接地条件相对较好, 可以通过实际工作中降低接地电阻获得较好的信号质量。同时激电方法也是针对金属矿产特别是与硫化物有关的金属矿最为直接、明确的技术手段, 能够实现一定程度属性探测作为直接找矿标志。电磁测深能够提供较为准确的深度信息, 获得地表覆盖层下方地质工作者难以观察到的基岩内部结构及隐伏构造, 提供矿产资源赋存位置的证据, 为更全面评价探索未知矿床提供巨大信息。综上所述, 基于秦岭地区高植被覆盖、深切割的实际情况, 最大限度使用较为轻便的地球物理仪器设备, 总结出了一套经济适用、方便可行、可信度高的地球物理方法技术体系能够提供找矿靶区一定范围的地球物理信息, 以及重点区域深部地质-地球物理模型, 有力的支撑项目在秦岭造山带内实现找矿新突破。

## 6 结论

(1) 通过优化滤波位场分离后的面积性高精度磁法异常, 并结合 CSAMT 工作发现了研究区隐伏岩体范围及形态, 推断了蟒岭岩体南缘各地层间接触关系、隐伏岩体侵位形成的推覆形态。

(2) 通过面积性地球物理探测(磁法、激电中梯)圈定了区内控矿断裂构造, 厘定了岩体、构造与矿体赋存关系, 确定了开展进一步工作的精细测量区域, 进而利用 CSAMT 方法定位预测了研究区内的赋矿构造的展布。在异常部位开展的探槽工程发现浅部矿体, 说明上述技术方法组合有效, 同时证明该区具备良好找矿前景。

(3) 在秦岭高植被覆盖、深切割地区采用地面高精度磁法、小功率激电与电磁测深的综合物探方法, 是较快捷、轻便有效的方法组合, 可以快速评价区域成矿潜力, 对已知异常进行圈定追索, 具备一定示范意义。

致谢: 感谢中国地质调查局西安矿产资源调查中心高永宝研究员、中国地质调查局西安地质调查中心刘宽厚正高级工程师对本文研究工作的指导, 对审稿专家提出的宝贵意见, 表示诚挚感谢!

## 参考文献(References):

- 程远, 秦曦, 赵晓晓, 等. 东秦岭铅钨银多金属矿集区地球物理场特征及综合信息找矿模型[J]. *地质与勘探*, 2018, 54(4): 747-761.
- CHENG Yuan, QIN Xi, ZHAO Xiaoxiao, et al. Geophysical Characteristics and Prospecting Model Based on Comprehensive Information in the Molybdenum, Lead, Zinc and Silver Polymetallic Ore Concentration Area of the East Qinling Mountains[J]. *Geology and Exploration*, 2018, 54(4): 747-761.
- 陈靖, 郭文波, 王宏宇, 等. 综合电磁法在凤太二里河铅锌矿深部的找矿效果分析[J]. *西北地质*, 2024, 57(1): 196-206.
- CHEN Jing, GUO Wenbo, WANG Hongyu, et al. Analysis on Prospecting Effect of Integrated Electromagnetic Methods in Deep Prospecting of Fengtai Erlihe Lead-Zinc Deposit[J]. *Northwestern Geology*, 2024, 57(1): 196-206.
- 党勘峰, 张望, 陈小刚, 等. 北秦岭蟒岭地区萤石矿地质特征与找矿潜力[J]. *矿产勘查*, 2020, 11(2): 286-294.
- DANG Kanfeng, ZHANG Zhan, CHEN Xiaogang, et al. Geological characteristics and prospecting potential of fluorite deposits in Mangling area, North Qinling Mountains[J]. *Mineral exploration*

- tion, 2020, 11(2): 286–294.
- 高猛, 付翰泽, 陈川. 遥感技术在和田玉成矿要素识别与找矿预测中的应用——以南阿尔金塔什萨依一带为例[J]. *西北地质*, 2019, 52(3): 240–252.
- GAO Meng, FU Hanze, CHEN Chuan. Hetian Jade Metallogenic Factors Identification and Prospecting Prediction by Remote Sensing Technology: Example from Tashisayi Area in South Altyn[J]. *Northwestern Geology*, 2019, 52(3): 240–252.
- 郭良辉, 孟小红, 石磊, 等. 优化滤波方法及其在中国大陆布格重力异常数据处理中的应用[J]. *地球物理学报*, 2012, 55(12): 4078–4088.
- GUO Lianghui, MENG Xiaohong, SHI Lei, et al. Preferential filtering method and its application to Bouguer gravity anomaly of Chinese continent[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(12): 4078–4088.
- 郭培虹, 耿涛, 冯治汉, 等. 基于地球物理场的华阳川铀矿区深部构造特征及其深部找矿潜力[J]. *西北地质*, 2024, 57(4): 182–190.
- GUO Peihong, GENG Tao, FENG Zhihan, et al. Deep Structural Characteristics and Prospecting Potential of Huayangchuan Uranium Deposit Based on Geophysical Field[J]. *Northwestern Geology*, 2024, 57(4): 182–190.
- 郭岐明, 赵江林, 陈清敏, 等. 东秦岭钼多金属成矿带蟒岭矿集区南部晚侏罗世埃达克岩的厘定及成矿意义[J]. *矿床地质*, 2019, 38(6): 1297–1320.
- GUO Qiming, ZHAO Jianglin, CHEN Qingmin, et al. Identification of adakitic rock in southern Mangling mining area of East Qinling molybdenum polymetallic metallogenic belt and its metallogenic significance[J]. *Mineral Deposits*, 2019, 38(6): 1297–1320.
- 姜寒冰, 李宗会, 杨合群, 等. 秦岭地区成矿单元划分[J]. *西北地质*, 2014, 47(2): 146–155.
- JIANG Hanbing, LI Zonghui, YANG Hequn, et al. Division of Metallogenic Unit in the Qinling Area[J]. *Northwestern Geology*, 2014, 47(2): 146–155.
- 焦阳, 冯俊环. 西秦岭地区猪婆沟金矿成矿物质来源及矿床成因分析[J]. *西北地质*, 2024, 57(1): 219–229.
- JIAO Yang, FENG Junhuan. Source of ore Forming Materials and Genesis of Zhupogou Gold Deposit in West Qinling Mountains[J]. *Northwestern Geology*, 2024, 57(1): 219–229.
- 柯昌辉, 王晓霞, 李金宝, 等. 北秦岭马河钼矿区花岗岩类的锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2012a, 28(1): 267–278.
- KE Changhui, WANG Xiaoxia, LI Jinbao, et al. Geochronology and geo- logical significance of the granites from the Mahe Mo deposit in the North Qinling[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012a, 28(1): 267–278.
- 柯昌辉, 王晓霞, 杨阳, 等. 北秦岭南台钼多金属矿床成岩成矿年龄及锆石 Hf 同位素组成[J]. *中国地质*, 2012b, 39(6): 1562–1576.
- KE Changhui, WANG Xiaoxia, YANG Yang, et al. Rock-forming and ore-forming ages of the Nantai Mo polymetallic deposit in North Qinling Mountains and its zircon Hf isotope composition[J]. *Geology in China*, 2012b, 39(6): 1562–1576.
- 李荣亮, 田建荣, 刘洋, 等. 综合物探方法在甘肃梧桐井铁铜多金属矿勘查中的应用[J]. *地质与勘探*, 2017, 53(4): 755–764.
- LI Rongliang, TIAN Jianrong, LIU Yang, et al. Application of integrated geophysical methods to exploration in the Wutongjing iron-copper polymetallic deposit of Gansu Province[J]. *Geology and Exploration*, 2017, 53(4): 755–764.
- 林方丽, 王光杰, 杨晓勇. 综合电磁法在矿区深部成矿机制中的应用研究——以皖南乌溪多金属矿区为例[J]. *地球物理学报*, 2016, 59(11): 423–4337.
- LIN Fangli, WAN Guangjie, YANG Xiaoyong. Application of comprehensive electromagnetic study in deep mineralization mechanism: A case study of the Wuxi polymetallic ore deposit, south Anhui[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59(11): 423–4337.
- 刘诚, 孙彪, 魏立勇, 等. 综合电法勘探在西秦岭寨上金矿的应用研究[J]. *地质与勘探*, 2020, 56(6): 1226–1237.
- LIU Cheng, SUN Biao, WEI Liyong, et al. Application of the integrated electrical method to exploration in the Zhaishang gold deposit, West Qinling[J]. *Geology and Exploration*, 2020, 56(6): 1226–1237.
- 刘诚, 李含, 孙彪, 等. 西秦岭寨上金矿综合地球物理研究[J]. *地质论评*, 2022, 68(2): 658–672.
- LIU Cheng, LI Han, SUN Biao, et al. Comprehensive geophysical study of Zhaishang gold deposit, West Qinling[J]. *Geological Review*, 2022, 68(2): 658–672.
- 刘诚, 唐卫东, 杨凯, 等. 荒漠浅覆盖区萤石矿定位预测技术研究[J]. *西北地质*, 2024, 57(4): 144–156.
- LIU Cheng, TANG Weidong, YANG Kai, et al. Research on Location and Prediction Technology of Fluorite Deposits in Shallow Desert Coverage Area[J]. *Northwestern Geology*, 2024, 57(4): 144–156.
- 刘鲜民, 徐新光, 李磊. 综合物探方法在河南夜长坪钨钼矿外围找矿中的应用及效果[J]. *矿产勘查*, 2015, 6(04): 445–450.
- LIU Xianmin, XU Xinguang, LI Lei. Application and prospecting effect of comprehensive geophysical prospecting in the adjacent region of Yechangping Mo deposit, Henan[J]. *Mineral Exploration*, 2015, 6(04): 445–450.
- 陆桂福, 米宏泽, 刘瑞德, 等. 综合物探在斑岩型银钼多金属矿勘查中的应用[J]. *物探与化探*, 2014, 38(4): 835–839.
- LU Guifu, MI Hongze, LIU Ruide, et al. The application of integrated geophysical exploration technology to the prospecting for porphyry silver-molybdenum poly- metallic deposits[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2014, 38(4): 835–839.



- 卢焱, 李健, 白雪山, 等. 地面磁法在隐伏铁矿勘查中的应用-以河北滦平Ⅱ号铁矿为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2008, 38(4): 698-702.
- LU Yan, LI Jian, BAI Xueshan, et al. Application of Magnetic Survey on Hidden Iron Deposit Prospecting Case Study on Luanping II Iron Deposit in Hebei Province China[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2008, 38(4): 698-702.
- 毛景文, 叶会寿, 王瑞廷, 等. 东秦岭中生代钨铅锌银多金属矿床模型及其找矿评价[J]. 地质通报, 2009, 28(1): 72-79.
- MAO Jingwen, YE Huishou, WANG Ruiting, et al. Mineral deposit model of Mesozoic porphyry Mo and vein-type Pb-Zn-Ag ore deposits in the eastern Qinling, Central China and its implication for prospecting[J]. Geological Bulletin of China, 2009, 28(1): 72-79.
- 孟小红, 石磊, 郭良辉, 等. 青藏高原东北缘重力异常多尺度横向构造分析[J]. 地球物理学报, 2012, 55(12): 3933-3941.
- MENG Xiaohong, SHI Lei, GUO Lianghui, et al. Multi-scale analyses of transverse structures based on gravity anomalies in the northeastern margin of the Tibetan Plateau[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(12): 3933-3941.
- 孟银生, 杨立强, 张瑞忠, 等. 第四系覆盖区深部热液脉型矿体综合地球物理方法定位预测——内蒙古维拉斯托矿区北侧隐伏矿体勘查例析[J]. 地球学报, 2016, 37(6): 745-755.
- MENG Yinsheng, YANG Liqiang, ZHANG Ruizhong, et al. Application of Integrated Geophysical Methods to the Prospecting for Concealed Hydrothermal Vein-type Orebodies beneath Quaternary Sediments: A Case Study of the Northern Area of the Weilasituo Copper Polymetallic Deposit[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2016, 37(6): 745-755.
- 庞振甲, 成欢, 冀月飞. 陕西省略阳县陶家沟地区地质地球物理特征及找矿预测[J]. 西北地质, 2022, 55(1): 93-100.
- PANG Zhenjia, CHENG Huan, JI Yuefei. Geophysical Characteristics and Prospecting Prediction of Taojiagou Area in Lueyang County, Shaanxi Province[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(1): 93-100.
- 任广利, 范廷宾, 余元军, 等. 多源遥感信息在喀喇昆仑火烧云一带找矿预测中的应用[J]. 地质与勘探, 2017, 53(6): 1164-1173.
- REN Guangli, FAN Tingbin, YU Yuanjun, et al. Application of multisource remote sensing information to metallogenic prediction in the Huoshaoyun region of Karakorum, Xinjiang[J]. Geology and Exploration, 2017, 53(6): 1164-1173.
- 孙博, 李桐林, 李鹤, 等. 可控源音频大地电磁测深法勘查深度研究[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(2): 836-839.
- SUN Bo, LI Tonglin, LI He, et al. Study on the sounding of CSAMT[J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(2): 836-839.
- 郇文星, 金尚刚, 何彦南, 等. 综合物探方法在湖北大冶鸡冠咀铜金矿深部及外围找矿中的应用[J]. 地质与勘探, 2019, 55(4): 1010-1025.
- TAI Wenxing, JIN Shanggang, HE Yannan, et al. Application of integrated geophysical methods to prospecting in the deep subsurface and peripheral area of the Jiguanzui copper - gold deposit in Daye of Hubei Province[J]. Geology and Exploration, 2019, 55(4): 1010-1025.
- 徐荣华, 楼法生, 刘献满, 等. 综合物探法在九瑞宝山—夫山地区找矿中的应用[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(6): 2571-2580.
- XU Ronghua, LOU Fasheng, LIU Xianman, et al. Applied of comprehensive geophysical prospecting method for exploring mine in Jiurui area[J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(6): 2571-2580.
- 张成信, 任永健, 金松, 等. 物化探综合找矿方法在内蒙古喀喇沁旗大西沟萤石矿找矿中的应用[J]. 西北地质, 2024, 57(4): 135-143.
- ZHANG Chengxin, REN Yongjian, JIN Song, et al. Application of Comprehensive Geophysical and Geochemical Exploration Method in the Daxigou Fluorite Deposit, Kalaqin banner, Inner Mongolia[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(4): 135-143.
- 赵小星. 西藏桑木岗地区遥感线性构造和蚀变信息提取与找矿预测[J]. 现代地质, 2017, 31(4): 851-859.
- ZHAO Xiaoxing. Extraction of Linear Structure and Alteration Information Based on Remote Sensing Images and Ore-prospecting Prognosis for Sangmugang in Tibet[J]. Geoscience, 2017, 31(4): 851-859.
- 周聪, 汤井田, 任政勇, 等. 音频大地电磁法“死频带”畸变数据的 Rhoplus 校正[J]. 地球物理学报, 2015, 58(12): 4648-4660.
- ZHOU Cong, TANG Jingtian, REN Zhengyong, et al. Application of the Rhoplus method to audio magnetotelluric dead band distortion data[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(12): 4648-4660.
- 朱雪丽, 董王仓, 李维成, 等. 陕南秦岭造山带侵入岩的控矿作用及其找矿意义[J]. 西北地质, 2021, 54(3): 163-173.
- ZHU Xueli, DONG Wangcang, LI Weicheng, et al. Ore-controlling Factors and Prospecting Significance of Intrusive Rocks in South Shaanxi Qinling Orogenic Belt[J]. Northwestern Geology, 2021, 54(3): 163-173.
- Han Yigui, Zhang Shihong, Pirajno F, et al. U-Pb and Re-Os isotopic systematics and zircon Ce<sup>4+</sup>/Ce<sup>3+</sup> ratios in the Shiyagou Mo deposit in eastern Qinling, central China: insights into the oxidation state of granitoids and Mo (Au) mineralization[J]. Ore Geology Reviews, 2013, 55: 29-47.
- Zeng Hualin, Xu Deshu, Tan Handong. A model study for estimating optimum upward-continuation height for gravity separation with application to a Bouguer gravity anomaly over a mineral deposit, Jilin province, northeast China[J]. Geophysics, 2007, 72(4): 145-150.